Verwendung des Spitzenzählers bei Messungen äußerer lichtelektrischer Wirkung

Inaugural-Dissertation

zur

Erlangung der Doktorwürde

einer

Hohen Naturwissenschaftlichen Fakultät

der

Eberhard-Karls-Universität

zu Tübingen

vorgelegt von

Heinrich Bauer

aus Kiel

Verlagsbuchhandlung Julius Springer in Berlin

1931

Referent: Professor Dr. H. Geiger

R. UNIV.
BIBLIOTHEEK
LEIDEN

Sonderabdruck aus der „Zeitschrift für Physik", Band 71, Heft 7/8

Meinen lieben Eltern

Die an Metallen bzw. an Isolatoren im Hochvakuum durch spektral zerlegtes Licht ausgelösten Elektronen werden durch ein elektrisches Feld beschleunigt und in einen Spitzenzähler geschossen. Es wird durch Abzählen der einzelnen in den Zähler geworfenen Elektronen festgestellt, welche Spektrallinie der Quarzquecksilberlampe gerade noch wirksam ist und welche nicht mehr. Auf diese Weise wurde die Lage der langwelligen Grenze eingegrenzt für die im Hochvakuum aufgedampften Metalle: Gold, Silber, Kupfer, Zink, Blei, Cadmium, Aluminium und für die Isolatoren: Hartgummi, Bernstein, Schwefel und Paraffin. (Zusammenfassung der Resultate in den Tabellen 2 bis 4). Ein Hauptvorteil der hier benutzten Methode liegt in der Möglichkeit der Untersuchung von Isolatoren, für die einwandfreie Messungen äußerer lichtelektrischer Wirkung im Hochvakuum und im spektral zerlegten Licht noch nicht vorlagen.

§ 1. Die bisherige Art der Verwendung des Spitzenzählers für solche Untersuchungen.

Schon im Jahre 1913 wurde der Spitzenzähler für lichtelektrische Untersuchungen herangezogen, jedoch in der Weise, daß man entweder die Spitze belichtete oder das Innere des Zählergehäuses, wobei dann die Spitze bzw. das Innere des Gehäuses aus dem zu untersuchenden Metall bestand[1]). Gegenüber der Benutzung der Methode des Schwebekondensators als einer Methode, die auch den Einzelprozeß zu beobachten gestattet, war hierdurch schon ein Fortschritt erzielt. Denn einerseits wurde das einfallende Lichtbündel besser ausgenutzt, andererseits war eine laufende Aufzeichnung möglich. Was die Anwendbarkeit für Isolatoren betrifft, war der Spitzenzähler allerdings dem

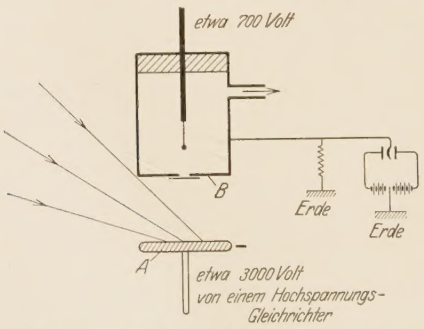

Fig. 1. Anordnung zur Untersuchung äußerer lichtelektrischer Wirkung.

[1]) P. Pringsheim, Verh. d. D. Phys. Ges. **15**, 705, 1913; ferner: W. Gerlach u. E. Meyer, ebenda **15**, 1037, 1913.

Schwebekondensator gegenüber bis jetzt im Nachteil. Mit dem Schwebekondensator gemeinsam hatte der so verwandte Spitzenzähler jedoch den Nachteil, daß man nicht im Vakuum untersuchen konnte. Dieser wesentliche Mangel bei der eben beschriebenen Art der Verwendung des Spitzenzählers wird nun behoben, wenn man den Zähler in einer Weise benutzt, die ich an Hand einer schematischen Fig. 1 erläutern möchte.

§ 2. Schematische Darstellung der neuen Art der Verwendung des Spitzenzählers für solche Untersuchungen.

Man stellt eine Platte (*A*) aus der zu untersuchenden Substanz im Hochvakuum der Stirnwand (*B*) eines Spitzenzählers parallel gegenüber. In der Mitte der Stirnwand befindet sich eine kreisrunde Öffnung von etwa 1 mm² Größe, die mit einer Celluloidfolie der ungefähren Dicke von 1000 bis 1400 Å verschlossen ist. Diese Folie hat die Aufgabe, das unter dem Druck von einigen Zentimetern Quecksilber stehende Zählervolumen von dem angrenzenden Vakuum zu trennen. Die zu untersuchende Metallplatte (*A*) — oder im Falle der Untersuchung von Isolatoren die Grundplatte aus Metall — wird auf einige tausend Volt negativ gegen die Stirnwand (*B*) des Zählers aufgeladen, indem man die Platte mit dem negativen Pol eines Kondensators verbindet, der von einem Hochspannungsgleichrichter geladen wird.

Fällt nun Licht, welches genügend kurzwellig ist, durch ein Quarzfenster auf die zu untersuchende Platte (*A*), so werden die ausgelösten Photoelektronen durch das nahezu homogene Feld zwischen der zu untersuchenden Platte und der Zählerstirnwand auf letztere zu beschleunigt und ein der Öffnung des Zählers entsprechender Teil der Elektronen kann auf Grund der erlangten Geschwindigkeit von einigen tausend Volt durch die Zählerfolie hindurchtreten und überdies im Zähler noch genügend Ionenpaare erzeugen, um den Zähler zum Ansprechen zu bringen. H. Kallmann[1]) und J. Hornbostel[2]) verwandten den Spitzenzähler in derselben Weise für die Bestimmung der Zahl und Geschwindigkeit von langsamen Elektronen, die aus dünnsten Schichten durch Röntgenstrahlen oder Elektronenstoß ausgelöst wurden.

§ 3. Die Aufgaben, die mit der neuen Methode in Angriff genommen wurden. Vorzüge der Methode.

Mit dieser empfindlichen Meßanordnung — Näheres über die Empfindlichkeit siehe in § 6 — wurde einmal die Lage der langwelligen

[1]) H. Kallmann, Phys. ZS. **30**, 526, 1929.
[2]) J. Hornbostel, Ann. d. Phys. (5) **5**, 991, 1930.

Grenze[1]) von einigen im Hochvakuum aufgedampften chemisch reinen Metallen festgestellt; überdies wurden bei verschiedenen Isolatoren die oberhalb 2000 Å liegenden Quecksilberlinien auf ihre Wirksamkeit oder Unwirksamkeit hin untersucht. [Der zur Verfügung stehende einfach zerlegende Ultra-Violett-Monochromator von der Firma Fuess (Berlin) reichte nur herab bis zu 2000 Å.] Die im Hochvakuum aufgedampften Metalle sollten untersucht werden, um zu sehen, ob sich nicht für die einzelnen Metalle reproduzierbare Werte für die Lage ihrer langwelligen Grenze ergeben. Letzteres interessiert, da die von verschiedenen Autoren angegebenen Werte für die langwellige Grenze ein und desselben Metalls sehr stark voneinander abweichen. Und die Isolatoren sollten untersucht werden, weil die neue Methode in bezug auf die Untersuchung der Isolatoren allen anderen Untersuchungsmethoden überlegen ist. In welcher Hinsicht dies bei Messungen mit dem Schwebekondensator der Fall ist, wurde schon in § 1 ausgeführt. Den elektrometrischen Methoden, die im allgemeinen mit Aufladungsmessungen arbeiten, ist die neue Methode vorzuziehen, weil bei ersteren die Aufladung des Isolators sehr störend wirkt und eine einwandfreie Messung unmöglich macht.

Daß diese Aufladung des Isolators bei unserer Methode nicht so leicht störend wirkt, liegt daran, daß wir die Potentialdifferenz zwischen Kathode und Anode größenordnungsmäßig größer machen können, als dies bei elektrometrischen Messungen möglich ist, so daß die durch die Aufladung des Isolators bewirkte Schwächung des Beschleunigungsfeldes nicht entfernt so schnell ins Gewicht fällt wie bei den elektrometrischen Messungen. Überdies braucht man bei der hier verwandten Methode zur Feststellung der Wirksamkeit einer Linie eine weit geringere Zahl von Elektronenaustritten als bei elektrometrischen Aufladungsmessungen, ist also auch dadurch hinsichtlich der störenden Aufladung im Vorteil.

§ 4. Über die Art der Behandlung der in Angriff genommenen Aufgaben.

Eine Aussage über die Lage der langwelligen Grenze wird hier in der Weise gewonnen, daß man unter den in der Quarzquecksilberlampe zur Verfügung stehenden Spektrallinien die erste Linie sucht, die lichtelektrisch nicht mehr wirksam ist, und die letzte Linie, die noch wirksam ist, wobei das Heraustreten der Linie aus dem Streulichtuntergrund bzw. aus dem

[1]) Unter der „langwelligen Grenze" eines Stoffes versteht man diejenige Wellenlänge, bei der das Licht nach längeren Wellen zu aufhört, äußere lichtelektrische Wirkung zu zeigen.

kontinuierlichen Untergrund als hinreichendes Kriterium für die Wirksamkeit derselben gilt[1]). Dann liegt die langwellige Grenze zwischen dieser ersten lichtelektrisch nicht mehr wirksamen Linie und der letzten noch wirksamen Linie. Wir betonen, daß auf diese Weise die Lage der langwelligen Grenze nur eingegabelt werden kann; aber lieber eine weniger weitgehende, sichere Aussage, als eine weitergehende unsichere Aussage[2]).

Aus dem oben Gesagten geht hervor, daß man, wenn es sich um die Angabe von Grenzen für die Lage der langwelligen Grenze handelt, auch bei Benutzung nur einfach zerlegten Lichtes sichere Aussagen machen kann. Diese Feststellung geschieht, weil in der vorliegenden Arbeit nur ein einfacher Monochromator verwandt werden konnte.

§ 5. *Beschreibung der Apparatur.*

Die Untersuchungskammer. Fig. 2 gibt ein Bild der benutzten zylindrischen Untersuchungskammer. (Schnitt senkrecht zur Achse des Zylinders.)

Das ultraviolette Licht fällt durch das bei den Messungen vertikal stehende Quarzfenster (A) auf die zu untersuchende Platte (B) (Metall oder Isolator). Durch das Glasfenster (C) beobachtet man, ob das aus dem Monochromator kommende Lichtbündel durch die zwischen Monochromator und Untersuchungskammer eingeschaltete Quarzlinse (Brennweite ungefähr 20 cm; freie Öffnung = 7 cm) in gewünschter Weise auf die Platte (B) konzentriert wird (Justierung mit $\lambda = 4360$ Å). Soll an im Hochvakuum aufgedampften Schichten untersucht werden, so wird die durch Verwendung von biegsamem Tombakschlauch beweglich gehaltene Untersuchungskammer für die Verdampfung so gedreht, daß das mit dem zu verdampfenden Metall beschickte Wolframboot (W) eine wagerechte Lage einnimmt. Durch einen exzentrisch angebrachten Metallkonusschliff — siehe K_1 in Fig. 3 — kann die zu untersuchende Platte nacheinander dem Wolframboot (W) und dem Spitzenzähler (Z) gegenübergestellt werden. Vor dem Aufdampfen wird der innere Metallzylinder (D)

[1]) Hebt sich die betreffende Linie aus dem Streulichtuntergrund bzw. aus dem kontinuierlichen Untergrund nicht heraus, so kann man keinen positiven Schluß ziehen, höchstens den, daß die Linie, wenn überhaupt, so nur noch relativ schwach wirksam ist.

[2]) Das weniger Weitgehende der sicheren Aussage fällt nicht so schwer ins Gewicht, da nach B. Gudden, „Lichtelektrische Erscheinungen", Berlin, Julius Springer, 1928, S. 38 folgendes gilt: „Es bleibt sicher, daß ein Schnitt der spektralen Verteilung unter endlicher Tangente mit der Wellenlängenachse (wie er meist gezeichnet wird) nicht in Frage kommt und daher die Angaben von λ_0 (der langwelligen Grenze) in Ångströmeinheiten eine unbegründete Genauigkeit vortäuschen."

vermittels eines Metallkonusschliffes (siehe K_2 in Fig. 3) so vorgedreht, daß sowohl die beiden Fenster als auch das Zählerhäutchen vor dem Be-

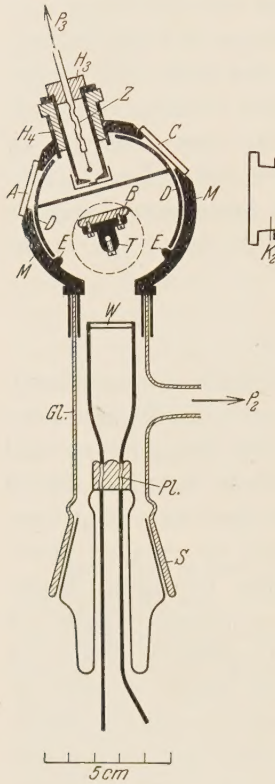

Fig. 2.

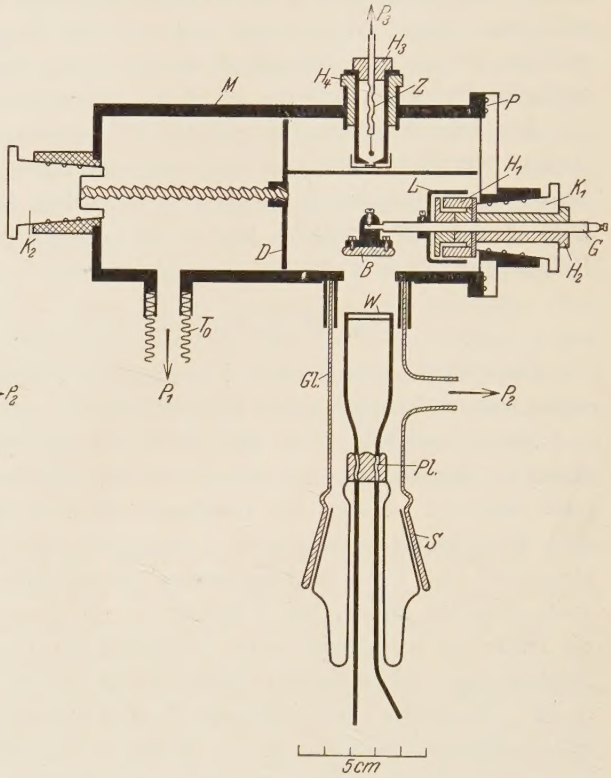

Fig. 3.

Fig. 2. Schnitt senkrecht zur Achse der zylindrischen Untersuchungskammer. *A* Quarzfenster; *B* die zu untersuchende Platte; *C* Glasfenster zum Justieren; *D* der innere verschiebbare Metallzylinder; *E* Metallknöpfe zur Führung des verschiebbaren Zylinders; *Gl* Glas; H_3 und H_4 Hartgummi; *M* massiver Messingzylinder; P_2 zur Quarzdiffusionspumpe; P_3 zur Pumpe fürs Zählervakuum; *Pl* Platineinschmelzung; *S* Glasschliff; *T* drehbarer Metalltisch; *W* Wolframwanne; *Z* Spitzenzähler.

Fig. 3. Achsenschnitt durch die zylindrische Untersuchungskammer und den Verdampfungsansatz.

B die zu untersuchende Platte; *D* der verschiebbare innere Metallzylinder; *G* Zuführung der Beschleunigungsspannung; *Gl* Glas; H_1 Kombination von Hartgummistücken zum Schutz des Isolators gegen vollständige Bedampfung mit Metall; H_2, H_3, H_4 Hartgummi; K_1, K_2 Metallkonusschliffe mit je drei Fettschutzrillen; *L* Metallkappe zum Schutz von H_1 gegen Bedampfung; *M* massiver Messingzylinder; *P* Messingplanschliff mit zwei Fettschutzrillen; P_1 und P_2 zur Quarzdiffusionspumpe; P_3 zur Pumpe fürs Zählervakuum; *Pl* Platineinschmelzung; *S* Glasschliff; *To* Tombakschlauch; *Z* Spitzenzähler.

dampftwerden geschützt sind. Die Fig. 3 und 4 sollen das Bild der Untersuchungskammer vervollständigen.

Fig. 4 stellt einen Grundriß des verschiebbaren inneren Metallzylinders dar. Die schwarz ausgezogenen Zylindermantelteile (X) und (Y) schützen das Quarzfenster bzw. das Glasfenster. Die schwarz ausgezogene Platte (V) schützt das Häutchen des Zählers. (N) ist eine Schraubenmutter.

Lichtquelle und Monochromator. Als solche wurde eine Quarzquecksilberlampe für 220 Volt Gleichstrom von Heraeus (Hanau) benutzt; das Leuchtrohr befand sich direkt vor dem Eintrittsspalt des Monochromators. Für die Untersuchung der aufgedampften Metalle wurde die Lampe sehr wenig belastet; sie brannte hier durchweg stabil mit ungefähr 1,9 Amp. und 35 Volt, da die Intensität leicht ausreichte und überdies der für die „Herausschälung" der Linien störende kontinuierliche Untergrund fehlte.

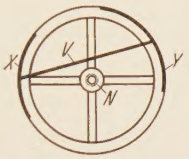

Fig. 4. Grundriß des verschiebbaren inneren Metallzylinders.

Bei der Untersuchung der Isolatoren war jedoch bei so geringer Belastung der Lampe die beobachtete Teilchenzahl zu gering. Die Lampe brannte hier im allgemeinen stabil mit ungefähr 2,7 Amp. und 85 Volt.

Für die Zerlegung des Lichtes wurde ein einfach zerlegender Monochromator von Fuess (Berlin) verwandt mit Wellenlängentrommel für den Bereich von 2000 bis 5000 Å. Als Dispersionssystem kommt bei diesem Instrument ein Quarzdoppelprisma nach Straubel mit einer konstanten Ablenkung von 90° zur Anwendung. Die beiden Objektive sind plankonvexe Quarzlinsen.

Der Spitzenzähler. Der benutzte Spitzenzähler (siehe Fig. 2 und 3) hatte einen Innendurchmesser von 1 cm. Das Platinkügelchen war ungefähr 3 mm von der Stirnwand des Zählers entfernt. Die in der Stirnwand des Zählers befindliche Öffnung von 1 mm Durchmesser war im allgemeinen durch eine 1000 bis 1400 Å dicke Celluloidfolie (entsprechend einer Interferenzfarbe zwischen klarem Gelb und Braungelb) gegen das Hochvakuum des Versuchsraumes abgeschlossen. Bei dem im allgemeinen benutzten Zählerdruck von 7 cm Hg lag die Einsatzspannung bei negativer Spitze bei etwa 600 Volt, die Arbeitsspannung etwa 40 bis 60 Volt höher. Zur Feststellung günstiger Zählbedingungen wurde die Zahl der registrierten Elektronen als Funktion der beschleunigenden Spannung untersucht bei

konstanter Zählerspannung. Bei den benutzten Folien einer Dicke zwischen 1000 und 1400 Å setzen die Ausschläge bei etwa 2,5 kV mit merklicher Intensität ein. Von dem dann folgenden raschen Anstieg, dem schließlich sehr langsamen Anstieg mit anschließender Sättigung soll uns Tabelle 1 ein Bild geben.

Tabelle 1[1]).

Abhängigkeit der Zahl der registrierten Elektronen von der Beschleunigungsspannung

Dicke des Celluloidhäutchens ungefähr 1400 Å.

Elektronengeschwindigkeit in Volt .	2500	3150	3800	4400	5050	6300	7600
Registrierte Teilchenzahl pro Minute bei negativer Spitze	3	31	65	103	117	115	120

Für die Wahl der Beschleunigungsspannung bei den eigentlichen Versuchen war maßgebend, daß eine gleich zu besprechende Störerscheinung nicht mehr auftrat. Dieser auch von anderer Seite[2]) beobachtete Effekt besteht darin, daß, wenn bei Abwesenheit jeglichen Lichtes die elektrische Feldstärke an der der Zähleröffnung parallel gegenüberstehenden Metallplatte einen gewissen Betrag überschreitet (etwa 4- bis 10000 Volt pro Zentimeter je nach Art und Oberflächenbeschaffenheit der zu untersuchenden Platte), aus der dem Metall anhaftenden Oberflächenhaut Elektronen oder Ionen losgerissen werden, die den Zähler zum Ansprechen bringen. Die Häufigkeit dieses Ansprechens des Zählers nimmt dann mit steigender Beschleunigungsfeldstärke rasch zu. Zur Beseitigung dieser Störerscheinung konnte hier nicht in der Weise vorgegangen werden, daß die zu untersuchende Platte geeignet behandelt, etwa poliert wurde, da ja an aufgedampften Schichten beobachtet werden soll. Ein Weg ist jedoch der: man wählt die Beschleunigungsspannung so klein, daß die Feldstärke nicht ausreicht, um Störteilchen loszureißen. Damit die betreffende Beschleunigungsspannung dennoch ausreicht, um die Photoelektronen durch das Häutchen treiben zu können, wählt man das Häutchen entsprechend dünn. So wurde bei der Untersuchung der Metalle mit einer Beschleunigungsspannung von ungefähr 3000 Volt gearbeitet, entsprechend einer Feldstärke von ungefähr 2500 Volt pro Zentimeter. Das Häutchen war braungelb, entsprechend einer Dicke von ungefähr 1400 Å. Die Störerscheinung war dann nicht mehr bemerkbar. — Anfangs wurde das Ansprechen des Spitzen-

[1]) Vgl. O. Klemperer, Ann. d. Phys. (5) **3**, 861, 1929; ferner: J. Hornbostel, l. c., S. 995.

[2]) J. Hornbostel, l. c., S. 992f.

zählers mit Hilfe eines Kolhörsterschen Fadenelektrometers beobachtet. Später wurde mit Hilfe eines Verstärkers, eines Relais' und eines Postzählers registriert.

Pumpen und Manometer. Als Hochvakuumpumpe diente eine Quarzdiffusionspumpe; zur Messung des Druckes im Hochvakuum wurde ein Mac Leodsches Manometer verwandt. Zwischen Diffusionspumpe und Untersuchungskammer befand sich eine Ausfriertasche, welche stets mit Ätherkohlensäureschnee beschickt wurde.

Meßergebnisse:

§ 6. Prüfung der Meßempfindlichkeit.

Um die Empfindlichkeit der Anordnung durch eine Vergleichsmessung mit einem Elektrometer abzuschätzen, wurde die emittierende Platte (*P* in Fig. 2 und 3) mit einem Paschenschen Quadrantelektrometer verbunden, das eine Empfindlichkeit von ungefähr $2 \cdot 10^3$ Skt. pro Volt bei etwa 1 m Skalenabstand besaß. Es zeigte sich, daß man mit dem benutzten Zähler, der eine Öffnung von 1 mm² Größe hatte und mit einer Celluloidfolie von ungefähr 1400 Å Dicke (entsprechend einer braungelben Interferenzfarbe) verschlossen war, in der Empfindlichkeit gut um eine Zehnerpotenz weiterkam. Während ich hinsichtlich der Gesamtphotoemission mit dem Elektrometer bis ungefähr $2 \cdot 10^{-15}$ Amp. kam, reichte der benutzte Spitzenzähler bei dieser Vergleichsmessung bis zu ungefähr 10^{-16} Amp. Gesamtphotoemission. Selbstverständlich wird unter anderen Versuchsbedingungen eine andere Meßempfindlichkeit der Anordnung resultieren. Es erscheint sehr wohl möglich, die Empfindlichkeit um eine Zehnerpotenz zu steigern, allein durch Vergrößerung der Zähleröffnung.

§ 7. Untersuchung an im Hochvakuum aufgedampften chemisch reinen Metallen.

Von den untersuchten Metallen: Gold, Silber, Kupfer, Zink, Blei, Cadmium, Aluminium wurden die chemisch reinsten Proben verwandt, die bei Kahlbaum erhältlich; Gold wurde als ff. Gold von der Scheideanstalt Hafner in Pforzheim bezogen. Jedes Metall wurde mehrfach untersucht, um zu sehen, ob sich die Resultate im wesentlichen reproduzieren lassen. Dies erwies sich als zutreffend.

Es ist allgemein bekannt, daß bei leicht oxydierbaren Metallen die Lage der langwelligen Grenze stark abhängt von der Beschaffenheit der

Oberfläche. Ein typisches Beispiel bilden die beiden Aluminiumkurven: Fig. 5 und 6. Die „Aluminium I-Kurve“ (Fig. 5) wurde an einer im Hochvakuum aufgedampften Schicht gewonnen; die Kurve „Aluminium II“ (Fig. 6) an derselben Schicht, mit dem einzigen Unterschied, daß sie inzwischen drei Stunden unter Atmosphärendruck gestanden hatte. Im übrigen sind die beiden Kurven unter sonst gleichen Bedingungen aufgenommen. Während bei „Aluminium I“ die langwellige Grenze zwischen

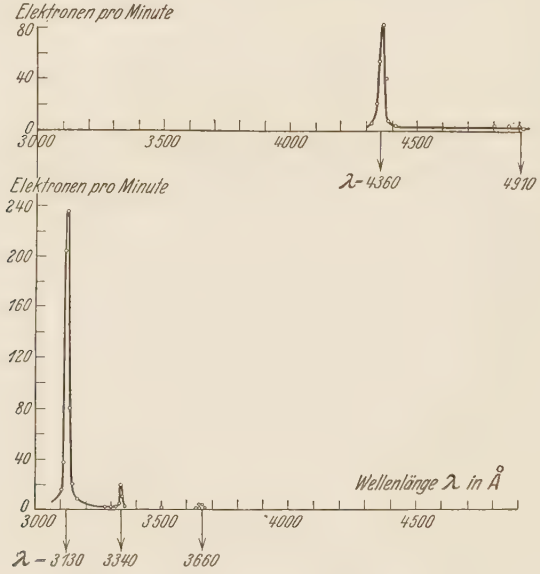

Fig. 5 und 6. Äußere lichtelektrische Wirkung an »*Aluminium I*“ (obere Kurve) und „*Aluminium II*“ (untere Kurve).

$\lambda = 4360$ und 4910 Å liegt, liegt sie bei „Aluminium II“ zwischen $\lambda = 3660$ und 4045 Å, aber dicht bei $\lambda = 3660$. Also eine Verschiebung der langwelligen Grenze von über 700 Å.

Die Fig. 7, 8, 9, 10, 11, 12 beziehen sich auf Gold bzw. Silber, Kupfer, Zink, Cadmium und Blei. Tabelle 2 faßt die erhaltenen Resultate zusammen und vergleicht sie mit den Resultaten anderer Autoren. Die in der Tabelle vorkommenden Zeichen A, B, C beziehen sich auf die von dem betreffenden Autor verwandte Methode zur Feststellung der langwelligen Grenze; die Zeichen a, b, c, d, e, f, auf die Oberflächenbedingungen. Die genaue Bedeutung dieser Zeichen findet sich am Fuß der Tabelle.

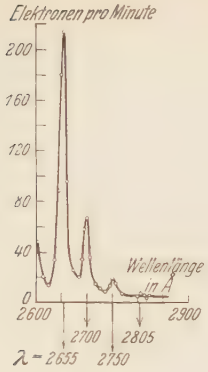

Fig. 7.
Äußere lichtelektrische Wirkung
an *Gold*.

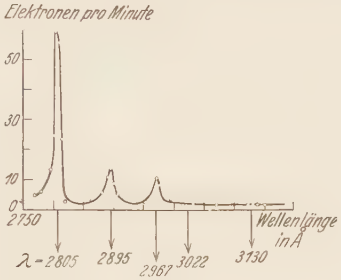

Fig. 8.
Äußere lichtelektrische Wirkung
an *Silber*.

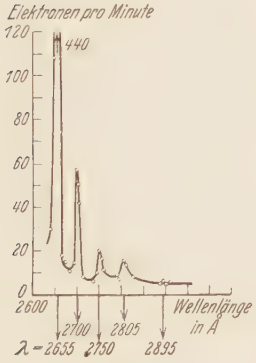

Fig. 9.
Äußere lichtelektrische Wirkung
an *Kupfer*.

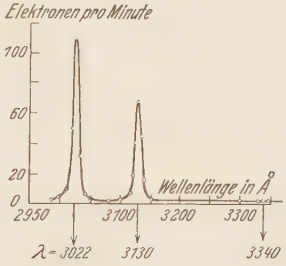

Fig. 10.
Äußere lichtelektrische Wirkung
an *Zink*.

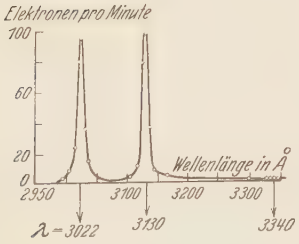

Fig. 11.
Äußere lichtelektrische Wirkung
an *Cadmium*.

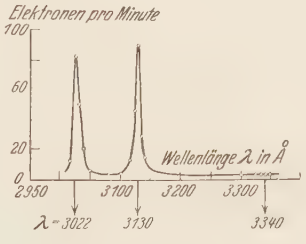

Fig. 12.
Äußere lichtelektrische Wirkung
an *Blei*.

Tabelle 2.

Äußere lichtelektrische Wirkung an verschiedenen Metallen.

Metall	Die hier gefundenen Grenzen für die Lage der langwelligen Grenze λ_0 in Å bzw. für die Austrittsarbeit in Voltelektron	Die von anderen Autoren gefundenen Werte für die langwellige Grenze in Å
Al	$4360 < \lambda_0 < 4910$ $2{,}82 > h \cdot \nu_0 > 2{,}51$	3590[1]): (A; a) 4130[4]): (B; b) 4110 (4770)[6]): (B; b) 3600[2]): (B; b) 3650 bis > 7000[5]): (A; d) 3460[7]): (C; b) 4070 (5460)[11]): (A; f)
Au	$2750 < \lambda_0 < 2805$ $4{,}48_4 > h \cdot \nu_0 > 4{,}39_6$	2600 bis 2730 (3020)[9]): (C; c) bzw. (A; c) 2625[7]): (C; b) 2850[10]): (A; e)
Ag	$2967 < \lambda_0 < 3022$ $4{,}15_5 > h \cdot \nu_0 > 4{,}08_3$	2620 bis 2890 (3130)[9]): (C; c) bzw. (A; c) 3250[8]) 3390[1]): (A; a) 3150[10]): (A; e) 3210[7]): (C; b) 3360[4]): (B; b)
Cu	$2803 < \lambda_0 < 2894$ $4{,}4 > h \cdot \nu_0 > 4{,}26$	2665[1]): (A; a) 2750[10]): (A; e) 3090[2]): (B; b) 3030[4]): (B; b) 3090 (3000)[6]): (B; b)
Zn	$3130 < \lambda_0 < 3340$ $3{,}94 > h \cdot \nu_0 > 3{,}69$	3020[3]): (B) 3420[1]): (A; a) 3360[7]): (C; b) 3570 (3760)[6]): (B; b) 4010[4]): (B; b) 3570[2]): (B; b)
Cd	$3130 < \lambda_0 < 3340$ $3{,}94 > h \cdot \nu_0 > 3{,}69$	3050[5]): (A; d) 3130[1]): (A; a) 3140[3]): (B) 3300[4]): (B; b)
Pb	$3130 < \lambda_0 < 3340$ $3{,}94 > h \cdot \nu_0 > 3{,}69$	2980[1]): (A; a) 3110[4]): (B; b) 3115[3]): (B) 3550[5]): (A; d)

A: Aus spektraler Verteilung;

B: Aus Höchstenergie;

C: Aus Wirksamkeit schwarzer Strahlung;

a: Oberflächlich mit Sandpapier poliert;

b: Sorgfältige mechanische Reinigung der Oberfläche in Luft von 760 mm Hg und sofort anschließende Untersuchung im Hochvakuum;

c: Durch Ausglühen im besten Hochvakuum entgast und von einer Oberflächenhaut befreit (verschiedene Grade des Entgasungszustandes);

d: Destillation im Vakuum;

e: Schichten durch Kathodenzerstäubung;

f: Im Hochvakuum geschabt.

[1]) R. Hamer, Journ. Opt. Soc. Amer. **9**, 251, 1924.
[2]) K. T. Compton u. O. W. Richardson, Phil. Mag. **26**, 549, 1913.
[3]) A. L. Hughes, Phil. Trans. London (A) **212**, 205, 1912.
[4]) P. Lukirsky u. S. Prilezaew, ZS. f. Phys. **49**, 236, 1928.
[5]) R. W. Pohl u. P. Pringsheim, Verh. d. D. Phys. Ges. **14**, 546, 1912.
[6]) O. W. Richardson u. K. T. Compton, Phil. Mag. **24**, 575, 1912.
[7]) S. C. Roy, Proc. Roy. Soc. London (A) **112**, 599, 1926.
[8]) O. Stuhlmann, Phys. Rev. (2) **15**, 549, 1920.
[9]) R. Suhrmann, ZS. f. Phys. **33**, 63, 1925.
[10]) S. Werner, Dissertation Upsala 1914.
[11]) H. Gerding, ZS. f. phys. Chem. (B) **11**, 1, 1930.

§ 8. Vergleich mit den Resultaten anderer Autoren.

Bei einem Vergleich der von den verschiedenen Autoren gefundenen Werte für die langwellige Grenze ein und desselben Metalls ist zu beachten, daß die Bedingungen, unter denen untersucht wurde, erkennbar verschieden waren (siehe diesbezüglich die Anmerkungen a, b, c, d, e, und f zu der Tabelle 2).

Man wird sich zunächst von der Vorstellung frei machen müssen, daß derjenige Autor die größere Meßempfindlichkeit erzielt hat, der für die langwellige Grenze den größeren Wert fand. Die Richtigkeit des eben Gesagten geht z. B. hervor aus einem Vergleich der sich auf Silber beziehenden Werte (siehe Tabelle 2). So resultiert aus den allgemein anerkannten Messungen von Suhrmann trotz sehr hoher Meßempfindlichkeit und trotz bester Entgasung des Silbers eine Grenze, die wesentlich kurzwelliger liegt, als dies z. B. bei den Messungen von Roy und Hamer der Fall ist. Letztere untersuchen unter den in der Tabelle 2 angegebenen Oberflächenbedingungen. Aus dieser Gegenüberstellung wird man weiter entnehmen dürfen, daß sich bei „reineren" Oberflächenbedingungen die langwellige Grenze zumindest in einigen Fällen nach kürzeren Wellen verschiebt.

Es sei noch kurz hingewiesen auf die von Lukirsky und Prilezaew an verschiedenen Metallen gefundenen langwelligen Grenzen und ihren systematischen Abweichungen von den von anderen Autoren gefundenen Werten. Diese Autoren haben zwar eine sehr hohe Meßempfindlichkeit erzielt, bringen aber meines Erachtens nicht ausreichende Beweise dafür, daß das Streulicht in einem der hohen Meßempfindlichkeit entsprechenden Maße ausgeschaltet ist. Nicht eliminiertes Streulicht kann aber die gefundenen systematischen Abweichungen vortäuschen.

Nach diesen Bemerkungen wird es verständlich, wenn wir trotz der großen Meßempfindlichkeit der hier benutzten Untersuchungsmethode für die untersuchten Metalle langwellige Grenzen finden, die zum Teil kurzwelliger liegen als bei manchen der anderen Autoren.

§ 9. Bisherige Messungen an Isolatoren.

Eine vollständige Übersicht über die von anderen Autoren angestellten Untersuchungen an Isolatoren soll hier nicht gebracht werden, da sich eine solche bei B. Gudden findet[1]).

[1]) l. c.

Wie bereits erwähnt, besteht die Schwierigkeit der elektrometrischen Messung äußerer lichtelektrischer Wirkung an Isolatoren darin, daß die infolge der lichtelektrischen Wirkung auftretende positive Aufladung den weiteren Elektronenaustritt verhindert. Diese Schwierigkeit kann man durch Anwendung des Schwebekondensators vermeiden. Allerdings muß beim Schwebekondensator auf Untersuchung im Vakuum verzichtet werden. Außerdem ist im allgemeinen spektrale Zerlegung aus Intensitätsgründen nicht durchführbar. Mit Hilfe des Schwebekondensators hat Kelly[1]) für Schwefel, Schellack und Paraffin Grenzwellenlängen ermittelt. Er stellte fest, daß die langwellige Grenze von Schwefel zwischen $\lambda = 2400$ und 2200 Å liegt, daß sie für Schellack etwas kürzer ist als $\lambda = 2200$ Å und daß sie für Öl und Paraffin unterhalb $\lambda = 2150$ Å liegen muß.

§ 10. Eigene Messungen an Isolatoren.

Für die Auswahl der zu untersuchenden Isolatoren war uns folgender Gesichtspunkt maßgebend: Es ist bekannt, daß man bei Isolatoren, die als chemischen Bestandteil Metall enthalten (wie z. B. die Alkalihalogenide, Quarz, Glimmer, gewöhnliches Glas und andere Mineralien), mit einem Einfluß der photochemischen Zersetzung rechnen muß. Die photochemische Zersetzung läßt freie Metallatome entstehen, und es kann daher sehr wohl sein, daß die beobachtete lichtelektrische Wirksamkeit zu einem überwiegenden Teil dem freien Metall zuzuschreiben ist. Um diese Fehlerquelle von vornherein auszuschalten, sollten nur Stoffe untersucht werden, die in ihrer chemischen Zusammensetzung kein Metall enthalten. Von solchen Isolatoren wurden untersucht: *Hartgummi* (spezifischer Widerstand ungefähr 10^{18} Ohm · cm), *Bernstein* (spezifischer Widerstand ungefähr 10^{16} Ohm · cm), *Schwefel* (spezifischer Widerstand ungefähr 10^{17} Ohm · cm), *Paraffin* (spezifischer Widerstand ungefähr $3 \cdot 10^{18}$ Ohm · cm). Davon bieten die beiden letzten Stoffe den Vorteil, daß man sie im Hochvakuum aufdampfen kann.

Bei den Untersuchungen wurde im einzelnen folgendermaßen verfahren: Aus Hartgummi bzw. aus Bernstein wurde eine etwa 2 mm dicke Scheibe hergestellt und mit einer Achatschneide abgeschabt. Paraffin und Schwefelschichten wurden in der Weise hergestellt, daß man die eine Fläche einer ebenen Metallplatte durch Eintauchen in flüssigen Schwefel bzw. in flüssiges Paraffin mit einer Schicht überzog. Diese Platten wurden nacheinander auf das drehbare Metalltischchen (T) (siehe Fig. 2) auf-

[1]) M. J. Kelly, Phys. Rev. (2) **16**, 260, 1920.

geschraubt und in derselben Weise wie bei den Metallen untersucht. Die Quarzquecksilberlampe mußte bei den Isolatoruntersuchungen aus Intensitätsgründen *wesentlich stärker* belastet werden als bei den Metalluntersuchungen. Sie brannte, wie erwähnt, bei der Untersuchung der Isolatoren stabil mit ungefähr 2.7 Amp. und 85 Volt, während bei der Untersuchung der Metalle mit ungefähr 1.9 Amp. und 35 Volt gearbeitet wurde.

In Anbetracht der sehr geringen lichtelektrischen Ausbeute an Isolatoren möge hier besonders hervorgehoben werden, daß bei der getroffenen Anordnung Elektronen, die an anderen Stellen als an der Isolatorfläche durch gestreutes Licht ausgelöst werden, nicht in den Zähler gelangen können.

Es wurde regelmäßig kontrolliert, wie häufig der Spitzenzähler ansprach, wenn man bei Abwesenheit der Beschleunigungsspannung mit den jeweiligen Linien einstrahlte. Dieses Ansprechen des Zählers hatte seinen Grund darin, daß durch Reflexion an der Isolatoroberfläche ultraviolettes Licht durch die Zähleröffnung hindurch auf die negativ geladene Zählerspitze (aus Platin) gelangt und dort hin und wieder Elektronen auslöst, die den Zähler zum Ansprechen bringen. In der Tat machte sich dieser Effekt bei der Untersuchung der Isolatoren bemerkbar, allerdings erst bei Wellenlängen unterhalb 2600 Å. Bei der Untersuchung der Metalle wurde dieser Effekt nicht beobachtet, einmal wohl infolge der wesentlich geringeren Intensität des einfallenden Lichtes; ferner auch wegen der größeren Wellenlänge der Linien, die bei den Metalluntersuchungen eingestrahlt wurden. Das Licht dieser Linien war nicht mehr fähig, aus der aus Platin hergestellten Zählerspitze Elektronen auszulösen.

Die Fig. 13 bis 19 geben uns ein Bild der erhaltenen Resultate. Für Paraffin konnte keine Kurve gezeichnet werden, da auch bei stark belasteter Quecksilberlampe im Gebiete von 2000 bis 5000 Å keine lichtelektrische Wirksamkeit festgestellt wurde. In den wiedergegebenen Kurven ist der oben erwähnte Nulleffekt bereits berücksichtigt. Von merklichem Betrage war er nur bei den sehr wenig lichtelektrisch wirksamen Bernstein- und Schwefelschichten und bei den überhaupt nicht wirksamen Paraffinschichten. Er betrug dort bei Einstrahlung mit der Linie $\lambda = 2540$ Å ungefähr 7 bis 8 pro Minute.

Es muß noch bemerkt werden, daß bei keinem der untersuchten Isolatoren eine durch den lichtelektrischen Effekt bewirkte Aufladung bemerkbar wurde durch zeitliches Absinken der Ausbeute. Das Nichtauftreten einer störenden Aufladung war zu erwarten nach einer sich auf

die Messungen an chemisch reinem Schwefel beziehenden Überschlagsrechnung, die im folgenden roh skizziert sei: Die Beschleunigungsspannung betrug ungefähr 5000 Volt. Da bei der Messung tatsächlich noch Photoelektronen registriert wurden, da ferner Elektronen mit einer Geschwindigkeit kleiner als rund 2500 Volt nicht mehr durch das benutzte Zählerhäutchen hindurchtreten konnten (siehe Tabelle 1), so kann eine etwaige

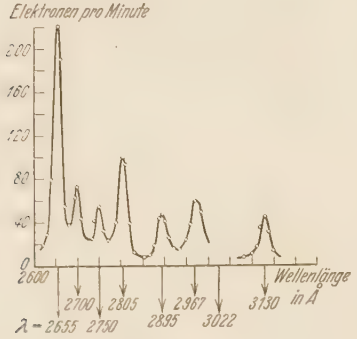

Fig. 13.
Äußere lichtelektrische Wirkung an einer polierten *Hartgummischeibe.*

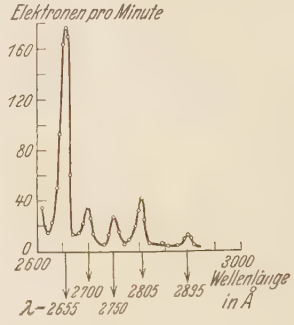

Fig. 14.
Äußere lichtelektrische Wirkung an einer mit einer Achatschneide abgeschabten *Hartgummischeibe.*

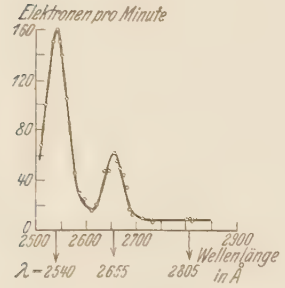

Fig. 15.
Äußere lichtelektrische Wirkung an einer mit einer Achatschneide abgeschabten *Bernsteinscheibe* (Preßbernstein).

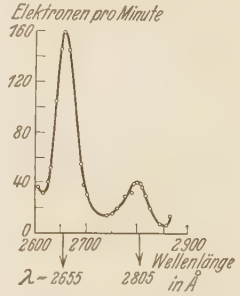

Fig. 16.
Äußere lichtelektrische Wirkung an einer *Schwefelschicht,* die mit Hilfe einer Metallplatte aus der Schmelze gezogen wurde *(gewöhnlicher Stangenschwefel).*

Aufladung des Isolators höchstens so stark gewesen sein, daß zwischen der Isolatoroberfläche und der Metallgrundplatte eine Potentialdifferenz von 2500 Volt bestand. Unter Annahme einer solchen Potentialdifferenz an der Schwefelschicht wurde nun der durch die ungefähr 1 mm dicke Schwefelschicht fließende Strom berechnet: *erstens* bei Außerachtlassung der inneren lichtelektrischen Wirkung der absorbierten Strahlung, *zweitens*

bei Berücksichtigung derselben. Jeder dieser beiden Ströme ergab sich um mehrere Zehnerpotenzen größer als der von der Oberfläche der Schwefelschicht ausgehende Photostrom.

Diskussion und Ergänzung der bei den Isolatoren erhaltenen Resultate. Wir möchten kurz die drei Kurven Fig. 17, 18 und 19 diskutieren, die bei gleicher Intensität des einfallenden Lichtes aufgenommen wurden. Man

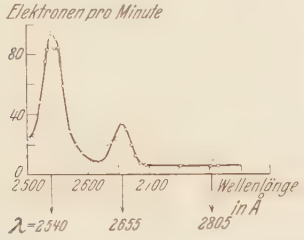

Fig. 17.
Äußere lichtelektrische Wirkung an einer *Schwefelschicht*, die mit Hilfe einer Metallplatte aus der Schmelze gezogen wurde *(chemisch reiner Schwefel)*. — Die Intensität des einfallenden Lichtes war die gleiche wie bei den zu den Fig. 15, 18 und 19 gehörigen Messungen.

Fig. 18.
Äußere lichtelektrische Wirkung an einer *Schwefelschicht*, die im Hochvakuum aufgedampft war auf eine mit Hilfe einer Metallplatte aus der Schmelze gezogenen Schwefelschicht *(chemisch reiner Schwefel)*. — Die Intensität des einfallenden Lichtes war die gleiche, wie bei den zu den Fig. 15, 17 und 19 gehörigen Messungen.

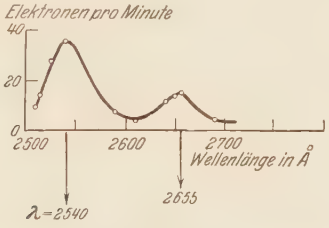

Fig. 19.
Äußere lichtelektrische Wirkung an der 3 Std. unter Atmosphärendruck gewesenen *Schwefelschicht* der zu Fig. 18 gehörenden Messung. — Die Intensität des einfallenden Lichtes war die gleiche wie bei den zu den Fig. 15, 17 und 18 gehörigen Messungen.

erkennt: Die Ausbeute der aufgedampften Schwefelschicht ist wesentlich geringer als die der aus der Schmelze gezogenen; sie ist auf etwa den sechsten Teil gesunken. Nachdem die aufgedampfte Schicht drei Stunden unter Atmosphärendruck gestanden hat, ist die Ausbeute auf das 2,5fache gestiegen. Auf Grund dieses Verhaltens ist es wahrscheinlich, daß die an den drei verschiedenen Schwefelschichten beobachtete lichtelektrische Wirksamkeit der Linien 2540 und 2655 Å nicht dem Schwefel zukommt,

Tabelle 3.

Äußere lichtelektrische Wirkung an verschiedenen Isolatoren.

Der untersuchte Isolator	Aussage über die langwellige Grenze λ_0 in Å bzw. die Austrittsarbeit in Voltelektron	Resultate anderer Autoren.
Hartgummi:		
a) poliert;	$\lambda_0 > 3130$ $h \cdot \nu_0 < 3{,}94$	
b) mit Achatschneide geschabt;	$\lambda_0 > 2895$ $h \cdot \nu_0 < 4{,}26$	
Bernstein (Preßbernstein): Mit Achatschneide geschabt;	$2805 > \lambda_0 > 2655$ $4{,}4 < h \cdot \nu_0 < 4{,}65$	
Schwefel (Stangenschwefel): Schwefelschicht, die mit Hilfe einer Metallplatte aus der Schmelze gezogen wurde.	$\lambda_0 > 2805$ $h \cdot \nu_0 < 4{,}4$	M. J. Kelly[1]): Mit Hilfe des Schwebekondensators: $2400 > \lambda_0 > 2200$
Schwefel (chemisch reiner von Merck):		
a) Schwefelschicht, die mit Hilfe einer Metallplatte aus der Schmelze gezogen wurde;	$2805 > \lambda_0 > 2655$ $4{,}4 < h \cdot \nu_0 < 4{,}65$	P. Tartakowsky[2]): Entfernung der durch Elektronenbeschießung auf der Oberfläche des Dielektrikums gebildeten Ladung mit Hilfe von Licht: $2540 > \lambda_0 > 2200$
b) im Hochvakuum aufgedampft auf eine unter a) charakterisierte Schicht;	$2805 > \lambda_0 > 2655$ $4{,}4 < h \cdot \nu_0 < 4{,}65$	
c) eine unter b) charakterisierte Schwefelschicht, die 3 Stunden unter Atmosphärendruck gestanden.	$2805 > \lambda_0 > 2655$ $4{,}4 < h \cdot \nu_0 < 4{,}65$	
Paraffin (reines Paraffin von Merck; Schmelzpunkt 68 bis 72° C):		
a) Paraffinschicht, die mit Hilfe einer Metallplatte aus der Schmelze gezogen wurde;	$\lambda_0 < 2300$ $h \cdot \nu_0 > 5{,}35$ Mit spektral zerlegtem Licht zwischen 2000 und 5000 Å keine äußere lichtelektrische Wirkung feststellbar	M. J. Kelly[1]): Mit Hilfe des Schwebekondensators $\lambda_0 < 2150$ Å
b) im Hochvakuum aufgedampft auf eine unter a) charakterisierte Paraffinschicht;	$\lambda_0 < 2300$ $h \cdot \nu_0 > 5{,}35$ Mit spektral zerlegtem Licht zwischen 2000 und 5000 Å keine äußere lichtelektrische Wirkung feststellbar	

[1]) l. c.

[2]) P. Tartakowsky, ZS. f. Phys. **58**, 394, 1929.

sondern einer Oberflächenschicht, etwa einer SO_2-Haut. — Um den typischen Unterschied in der lichtelektrischen Ausbeute zwischen den Isolatoren und den Metallen klarer hervortreten zu lassen, sind in Tabelle 4 Bernstein und Schwefel mit Gold verglichen, und zwar für die Linie 2655 Å. Zur Ermöglichung dieses Vergleichs wurde einmal die Größe des auf der untersuchten Platte befindlichen Spaltbildes mit Hilfe von photographischem Papier ausgemessen; ferner wurde die Menge des sekundlich eingestrahlten Lichtes mit Hilfe einer geeichten Photozelle bestimmt. Da das Fenster der zur Verfügung stehenden Photozelle erst oberhalb 3000 Å durchließ, wurde statt der eigentlich zu bestimmenden Menge der bei Einstellung auf $\lambda = 2655$ Å eingestrahlten Lichtenergie diejenige bestimmt, die bei Einstellung auf $\lambda = 4360$ Å sekundlich eingestrahlt wurde. Da bekanntlich aber die relativen Intensitäten der Quecksilberlinien bei verschiedener Belastung der Lampe nicht konstant sind (beim Übergang von schwacher zu starker Belastung der Quecksilberlampe kann sich das Intensitätsverhältnis zweier Linien maximal etwa um den Faktor 2 ändern), so dürfen die in der Tabelle 4 angegebenen Ausbeuteverhältnisse nur als grobe Näherungswerte angesehen werden. Eine Änderung der angegebenen Ausbeuteverhältnisse würde natürlich eintreten, wenn man statt auf die Linie $\lambda = 2655$ Å auf eine kurzwelligere Linie Bezug nehmen würde.

Tabelle 4.

Vergleich der lichtelektrischen Ausbeute von Bernstein und Schwefel mit der von Gold.

Isolator	Verhältnis der Ausbeute an Gold zu der am Isolator (bezogen auf die Linie $\lambda = 2655$ Å)
Bernstein (Preßbernstein): Mit Achatschneide geschabt;	220 : 1
Schwefel (chemisch reiner von Merck):	
a) Schwefelschicht, die mit Hilfe einer Metallplatte aus der Schmelze gezogen wurde;	430 : 1
b) im Hochvakuum aufgedampft auf eine unter a) charakterisierte Schicht;	2150 : 1
c) eine unter b) charakterisierte Schwefelschicht, die 3 Stunden unter Atmosphärendruck gestanden hatte.	860 : 1

Zusammenfassung.

Es wird berichtet über eine neue Art der Verwendung des Geigerschen Spitzenzählers für Untersuchungen äußerer lichtelektrischer Wirkung

an Metallen und Isolatoren. Mit dieser Methode werden Aussagen gewonnen über die Lage der langwelligen Grenze folgender Stoffe:

1. der im Hochvakuum aufgedampften chemisch reinen Metalle: Gold, Silber, Kupfer, Zink, Cadmium, Blei und Aluminium (Zusammenfassung der Resultate in Tabelle 2).

2. der Isolatoren: Hartgummi, Bernstein, Schwefel und Paraffin (Zusammenfassung der Resultate in Tabelle 3).

Tabelle 4 gibt einen angenäherten Vergleich der lichtelektrischen Ausbeute von Bernstein und Schwefel mit der von Gold bei der Linie $\lambda = 2655$ Å.

Vorstehende Arbeit wurde begonnen im Physikalischen Institut der Universität Kiel und beendet im Tübinger Physikalischen Institut.

Herrn Prof. Dr. H. Geiger möchte ich auch an dieser Stelle herzlich danken für die Anregung zu dieser Arbeit, für seine wertvollen Ratschläge und für seine ständige Anteilnahme. Danken möchte ich ferner Herrn Privatdozenten Dr. Chr. Gerthsen für mannigfache Ratschläge während meiner Tübinger Arbeitszeit und Herrn Dr. O. Klemperer für seine Beratung während meiner Kieler Arbeitszeit.

Tübingen, im April 1931.

Lebenslauf

Am 25. November 1905 wurde ich, Heinrich Otto Max Bauer, preußischer Staatsangehöriger, als Sohn des Gärtnereibesitzers Carl Bauer und seiner Ehefrau Dorothea, geb. Benn, in Kiel geboren. Als Schule besuchte ich die Oberrealschule II in Kiel, die ich Ostern 1924 mit dem Zeugnis der Reife verließ. Ich studierte darauf mit zeitweiser Unterbrechung: Physik, Mathematik, Mineralogie und Philosophie an den Universitäten Kiel und Tübingen (wohin ich Herrn Professor Dr. H. Geiger bei seinem Fortgang aus Kiel folgte) und hörte Vorlesungen bei den Herren Professoren und Dozenten: Baier, Diels, Dieterici, Geiger, Gerthsen, Hasse, Kossel, Landé, Mumm, Neuendorff, Robert Schmidt, W. Schmidt, Scholz, Spangenberg, Steinitz, Töplitz, Wirtz und Zahn. Ihnen allen sage ich hiermit meinen besten Dank.

Die Promotionsprüfung bestand ich am 18. Juni 1931 vor den Herren Professoren: H. Geiger (Physik), K. Knopp (Mathematik), F. Machatschki (Mineralogie).